

橋梁用防護柵の性能照査型統合設計システム

伊藤義人¹・鈴木達²

¹フェロー会員 工博 名古屋大学教授, 附属図書館長 理工科学総合研究センター
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生員 名古屋大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

近年, 従来型の仕様規定に基づく設計と比較して, 新しい技術を取り入れる自由度の高い性能照査型設計が注目されている. 防護柵の性能照査型設計法は, 平成11年4月の防護柵設置基準改訂において始めて導入された. また, 地球環境問題が重要なものとなってきており, 土木分野においてもライフサイクルを通じて安全性, コスト, 景観と同様に環境負荷についても十分な注意を払う必要がある. 本研究においてはまず現状の防護柵設計の問題点を明らかにした. その結果を基に橋梁用防護柵の環境負荷を考慮した性能照査型統合設計システムを提案, 開発し, 環境要求性能, 安全性能など様々な性能に優れた防護柵を設計できることを示した.

Key Words : performance-based design, bridge guard fences, LCA, LCC

1. はじめに

従来型の仕様規定型構造設計では, 構造物がどのような時にどのように挙動するかということが不明確である場合が多い. これは, 設計が決められた手順をたどるような形で行なわれ, 設計の手順には適合しているが, 例えば大きな地震動が作用したときの構造物の極限挙動が明確に検討されていないからである¹⁾.

現行設計基準の欠点を克服するための1つの方法として提唱されてきているのが性能照査型設計 (performance-based design) である²⁾. 性能照査型とは, 設計された構造物が要求性能さえ満足していれば, どのような構造形式や構造材料, 設計方法, 工法を用いても良いとする設計方法である³⁾. 日本では, 1995年1月の阪神・淡路大震災により性能照査型設計の必要性が認識され始めたことを契機として, 建築基準法 (1998年), 道路橋示方書 (2002年), コンクリート標準示方書 (2006年予定) など様々な設計法の改正が進められている.

また, 性能照査型設計は安全性や使用性に加え, 環境負荷低減を性能として扱い総合的に評価することができ, 地球環境問題に対処し社会の要求にこたえることが可能である. ライフサイクル全体における環境負荷を評価する手法としてLCA (ライフサイクルアセスメント) があり, 欧米を中心に発展してきた^{4) 6)}. 日本の土木分野におけるLCA研究は, 橋

梁や道路舗装など重要構造物や社会基盤施設全体に対して行われてきた. 例えば, 環境負荷を考慮した橋梁形式選定システム⁷⁾, 従来型橋梁と合理化橋梁の環境負荷の比較検討⁸⁾, 環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価⁹⁾, 土木構造物の環境負荷を算定するための原単位整備と橋梁などを対象とした環境負荷の試算¹⁰⁾, 社会資本整備に係わるLCA手法の体系化と環境評価の総合化¹¹⁾などがある.

日本において性能照査型設計法は, 防護柵設置基準において初めて導入され, 防護柵の有すべき性能が規定された¹²⁾. 防護柵の有すべき性能とは, i) 車両の逸脱防止性能 ii) 乗員の安全性能 iii) 車両の誘導性能 iv) 構成部材の飛散防止性能の4つの安全性能であり, 最終性能照査は道路管理者が実車衝突実験によって行うこととされている.

しかし, 1999年に新しい設置基準が導入されてから現在に至るまでに, 様々な問題点が指摘され始めている. 防護柵設置基準の問題点を以下に示す.

① 実車衝突実験のコスト

実車衝突実験は, 開発者が多大なコストを負担しなければならないため, 新しい防護柵形式の開発の大きな障害となっており設計の自由度が活かされていない.

② 防護柵に求められる性能

地域特性や環境の配慮などは道路管理者の判断に任されており, 積極的に対応していない. より優れた性能を持った防護柵を開発するためには, 安全性

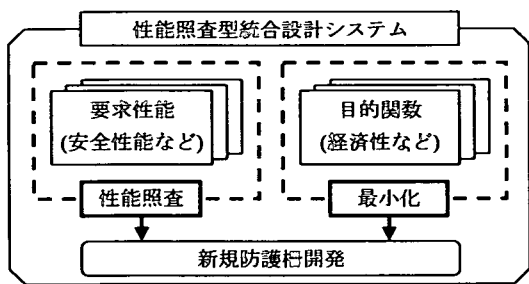


図-1 性能照査型統合設計システム

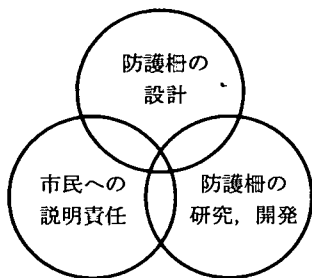


図-2 設計システムの対象

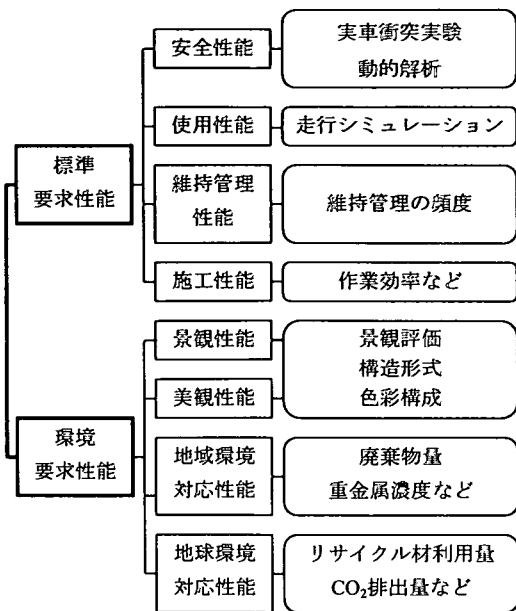


図-3 防護柵の要求性能

能以外も明確に基準に定める必要がある。

③ 環境負荷低減

防護柵は土木構造物であるが一品生産ではなく製品として販売されており大量生産されるという特徴がある。つまり、環境負荷を考慮して設計すれば多くの防護柵に反映され、大幅に環境負荷を低減できる可能性がある。すなわち、元々大量生産製品開発を対象に考えられたLCAを適用する意義は十分ある。

そこで、本研究ではこれらの問題点を解決し、より優れた防護柵設計となるために、2章の図-3で説明する新たに取り入れた使用性能、地球環境対応性能などの複数の要求性能の性能照査と目的関数の最小化を効率的に行い、ライフサイクルを考慮して橋梁用防護柵を開発する図-1に示すような性能照査型統合設計システムを開発し、防護柵設計の方向性を示すことを目的とする。本研究では、まずシステムの枠組みの考察と構築を行い、新たに取り入れた環境負荷低減性と経済性をLCA、LCCによって評価し、最後に新規防護柵を開発することによってシステムの検証を行なった。本研究では、性能照査型設計法に環境負荷低減などを取り入れた統合システムの構築を初めて試みる。

本論文は、第1筆者が参加した委員会^{3),13)}の活動成果を作って、さらにそれを防護柵を対象にして具体化したものであり、次のような特徴がある。

- 1) 性能照査型設計が防護柵設置基準で採用されているが、実験を前提としており、本論文で世界で初めて衝突数値解析と要求性能を組み

込んだ設計フローを明確にしている。

- 2) 種々の防護柵のLCCおよびLCAについて、まとまった形で初めて取り扱い、その特徴を明らかにしている。
- 3) 防護柵の開発フローと設計フローを分離して、どのようにLCC及びLCAが取り入れられるかを示し、統合システムとして提示している。

なお、本研究で提案する性能照査型統合設計システムの枠組みおよび考え方の一部は、土木構造物全般に適用できる可能性があり、性能設計の枠組み、要求性能の評価も含め現時点では確立しているとはいえない性能照査型設計の今後の方向性を示すものでもありと考えられる。

2. 性能照査型統合設計システムの構築

(1) 性能照査型統合設計システムの枠組み

防護柵は、供用時における偶発的な車両衝突を主な対象としており、ライフサイクル全体で、安全性、使用性などの要求性能を保持していかなければならない。このような防護柵の特徴と、性能照査型設計の利点である、設計の自由度の拡大、技術の発展、設計内容の明確化を生かすために、図-2に示すように、防護柵の設計、防護柵の研究・開発を対象とし、市民への説明責任に反映させるシステムとする。この3つを対象とすることにより、研究、開発された防護柵を円滑に設計に取り入れ、設計者が市民に対しての責任を果たすことができると考えた。

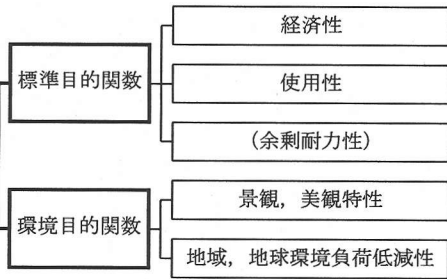


図-4 防護柵の目的関数

表-1 車両用防護柵の種別の適用

道路区分	設計速度	一般区間	重大な被害が発生するおそれのある区間	新幹線などと交差または近接する区間
高速自動車国道	80km/h	A	SB	SS
自動車専用道路	60km/h		SC	SA
その他の道路	60km/h	B	A	SB
	50km/h	C	B	

A, B, C, SA, SB, SC, SS : 防護柵の種別の記号

表-2 逸脱防止性能マトリックス

逸脱防止性能レベル 衝突速度	構造安全性			
	安全			破壊
	事故発生時および事故後の状態			
	無損傷	小, 中損傷	大損傷	路外へ逸脱
設計速度×0.6	○	△	□	容認不可
設計速度×0.8	○	△	□	
設計速度×1.0		○	△	
設計速度×1.2			○	

○—○ 最重要構造物
△—△ 重要構造物
□—□ 普通構造

(2) 防護柵に求められる性能

始めに、防護柵に求められる性能を決定する。環境負荷を考慮した性能照査型設計法としては、2005年愛知国際博覧会協会委託の土木学会の環境負荷低減型土木構造物ガイドラインにおいて、従来型の設計評価項目に加えて、環境負荷低減性を考慮し、一体的に評価する環境負荷低減型土木構造物ガイドラインが提案されている¹³⁾。本研究においても、要求性能を図-3に示すように従来型の標準要求性能と環境負荷などを考慮する環境要求性能に分類した。

最も重要な防護柵の要求性能は、安全性能であり防護柵設置基準によって規定されている。本研究では安全性能に加え、使用性能、維持管理性能、施工性能を取り入れる。使用性能とは走行中の視認誘導が容易に行なわれるための視認誘導性、乗員に圧迫感を与えない展望性などがあり防護柵の重要な目的の一つである。また、環境要求性能として、景観特性、美観性能、地域環境対応性能、地球環境対応性能を扱う。また、性能照査は、動的解析、走行シミュレーションなどによって行なう。

要求性能とは、制約条件にあたり応答値 S と限界値 R を比較する性能照査式 ($S \leq R$) によって評価される。構造物設計には要求性能のほか、例えば経済性のような最小化または最適化しなければならない目的関数が存在する。本研究では、防護柵設計の目的関数として、図-4に示すような標準目的関数と

表-3 車両用防護柵の種別の適用

設計速度	普通構造物	重要構造物	最重要構造物
100km/h以上	SB	SA	SS
80~100km/h	SC	SB	SA
60~80 km/h	A	SC	SB
50~60km/h	B	A	SC
50km/h以下	C	B	A

環境目的関数に分類した。ここで、目的関数と要求性能と重複しているものは、要求性能によって制約条件を満たし、目的関数によって最小化または最適化するというような二面性をもったものを扱う。

ただし、要求性能と目的関数には様々な考え方があり、本研究で目的関数として取り入れた環境負荷低減性なども制約条件と考え、要求性能に含める場合もある。しかし、現実的に考えた場合、具体的な制約条件を指定することは困難である。明確な規定が今後されたならば、要求性能として扱うのことも可能であろう。

(3) 要求性能マトリックス

要求性能マトリックスとは、構造物の重要度に応じて構造物に付与すべき性能を選択するためのもので、想定される外力と付与すべき性能とをマトリッ

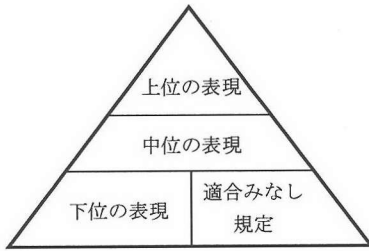
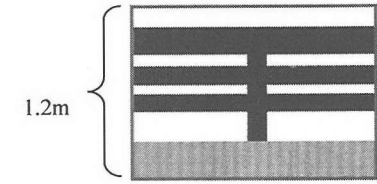


図-5 要求性能の階層化



$$\text{遮蔽率 (\%)} = \frac{\text{防護柵全投影面積}}{1.2\text{m} \times \text{全長}} \times 100$$

図-6 遮蔽率

表-4 安全性能の上位および中位の表現

荷重	上位	中位
車両速度	事故の被害を最小限にとどめる	① 防護柵が突破されない ② 乗員の安全が確保される ③ 車両が転落、転倒しない ④ 車両が円滑に誘導される ⑤ 部材が飛散しない

表-5 安全性能の下位の表現

限界状態	評価性能	指標	照査 ($S \leq R$)	
			応答値S	限界値R
強度限界	強度性能	強度	最大強度	破断強度
変位限界	変位性能	変位	最大進入行程	規定値
人命限界	乗員被害	加速度	最大加速度	規定値
誘導限界	離脱速度	速度	離脱速度	衝突速度の6割
	離脱角度	角度	離脱角度	衝突角度の6割

クスで示したものである¹³⁾。

防護柵の要求性能の中でマトリックスを必要とするものは、まず安全性能の一つである車両の逸脱防止性能である。防護柵設置基準では、表-1に示す道路区分と設置区間の特徴に応じた種別の適応が規定されているが、近年の車両の高速化に対応できないという問題が出てきており、第二東名では一般区間に施工者の判断で新幹線と交差する区間と定められているSS種を設置している。なお、表中の記号は、防護柵の種別であり、最も低い規格がC種であり、最高の規格がSS種である。ここでは逸脱防止性能のマトリックスは、表-2に示すように縦軸に設計速度、横軸に損傷度を定義し、防護柵の重要度に応じて付与すべき性能を選択する。さらに、乗員の安全性能、車両の誘導性能などの他の安全性能を考慮し、表-3に示すような縦軸に設計速度、横軸に構造物の重要度だけで種別を適応すれば、車両の高速化に柔軟に対応することが可能となる。

表-6 形式別遮蔽率

防護柵形式	断面積 (m ²)	遮蔽率 (%)
コンクリート製防護柵	1.10	91.7
橋梁用防護柵	0.588	49.0
複合防護柵	0.865	72.0

マトリックスは、荷重のレベルに差がない場合や構造物の重要度に差を付けない場合は、必要がないとされている³⁾。この条件を当てはめると、防護柵では安全性能の逸脱防止性だけがマトリックスを必要とする。しかし、設計の明確化のためには縦軸に荷重だけではなく、環境の違いをとることも有用である。

(4) 要求性能の階層化

要求性能を一般の人および技術者が理解できる表現で表すために、図-5に示す土木鋼構造物の性能設計ガイドライン³⁾の階層化を参考に、一般の人が理解できる上位の表現、定性的な中位の表現、定量的な下位の表現に階層化する。

防護柵の安全性能の上位の表現と中位の表現を表-4に示す。車両の衝突に対しては、事故の被害を最小限にとどめることが求められる。これが上位の表現となる。下位の表現は表-5に示すようになり、例えば、中位の表現の①、⑤は、強度性能として、破断強度を超えないことを満足すること、②～④は、防護柵の設置基準で規定されている値を満足することが定量的な表現となる。

使用性能などの下位の表現は明確な指標が示されておらず表現することは難しいが、既存の防護柵より悪いものを作らないというのが制約条件となると思われる。例えば、使用性能の1つの展望性は、遮蔽率で評価することを提案する。遮蔽率とは、図-6に示すように防護柵の全投影面積を高さ1.2mとした面積に占める割合である。高さ方向を1.2mとしたのは、防護柵の高さの違いによる影響を考慮するために、最も高い防護柵を基準としたためである。各種防護柵の遮蔽率は、表-6に示すようになりコンクリー

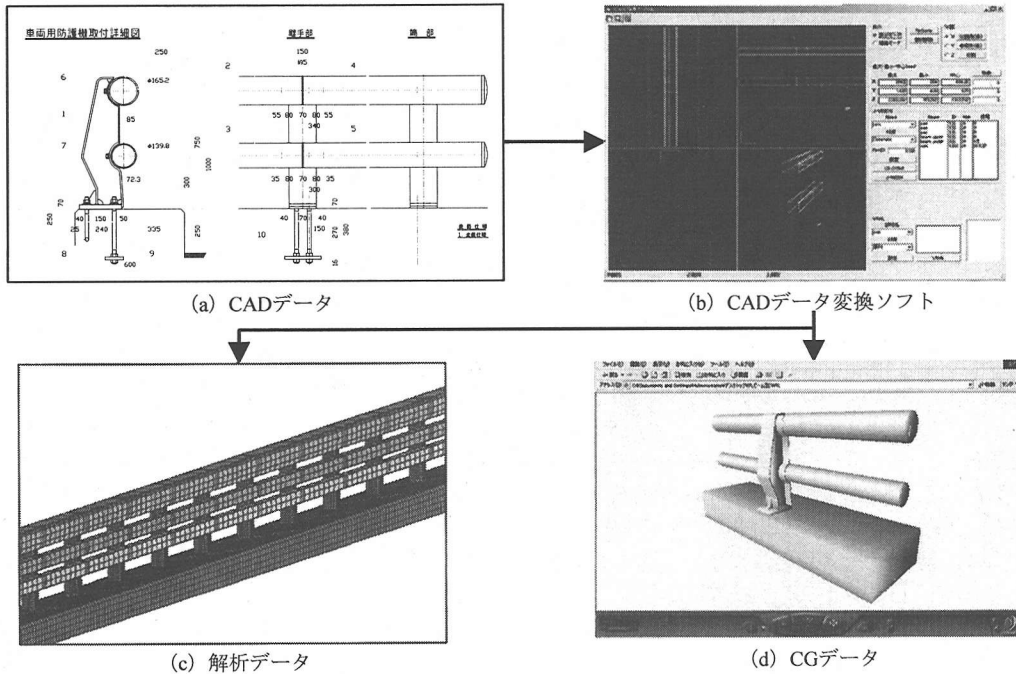


図-7 CADデータ変換ソフトの概要

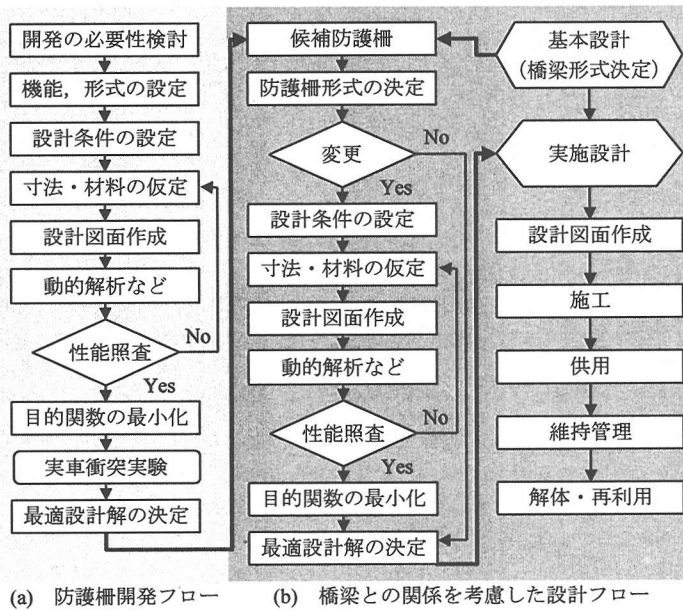


図-8 防護柵の性能設計フロー

ト製防護柵の91.7%が最大となり、この値が制約条件となる。

(5) 各種要求性能と目的関数の効率的な評価

性能照査型設計は、求められる性能を満たすことにより評価されるが、別々に作業を行い評価する

のでは設計者にかかる負担が大きくなる。また、簡便な技術でなければ多大なコストが必要となり、設計の自由度の足枷となり、性能照査型設計が有効に活用されない可能性が出てくる。

このことから、多数ある性能評価を簡便な技術でどのように効率的に行うかが設計過程において非常に

重要になってくる。

現在、防護柵設計では、設計図面つまりCAD図面が基点となっている。しかし、防護柵設計でのCAD図面は、これまで性能評価に使われることはなく、構造形式、材料の明示など従来型の使用方法でしかない。防護柵の性能評価では、安全性能の評価に車両衝突解析を用い、使用性能、景観性能、美観性能の評価にCG（走行シミュレーション、景観評価）を用いる。車両衝突解析、CGはともに3次元データを使用するので、CADデータを活用できる可能性がある。

本研究では、CADデータの活用を検証するために、解析データおよびCGデータ変換ソフトを開発した。この変換ソフトは、図-7に示すようにCADデータを表示、解析データおよびCGデータに書き出すことができる。このソフトを性能照査型システムの検証において実際に使用し、各種要求性能の評価を効率的に行え、時間とコストを大幅に低減できることが確かめられた。従来、CADデータを基に解析モデルやCGデータを作ると数日はかかっていたが、今回の手法をとると約1/10以下の時間で可能となった。

なお、CGは低コストで簡便な技術であるWEB上でも閲覧可能なVRML（Virtual Reality Modeling Language）形式を用いたが、ファイルサイズが大きいなどの問題もある。しかし、CG技術は日々進歩しており、データ形式の変換も容易であるので汎用性は大きいと考えられる。

(6) 性能照査型設計フロー

性能照査型システムの設定、要求性能などを踏まえた防護柵を開発、設計するための性能照査型設計フローを図-8に示す。この設計フローの特徴は、防護柵が一品生産ではなく製品である場合が多いことをふまえ、開発フローと橋梁との関係を考慮した設計フローに分けたところである。また、実車衝突実験を性能照査後の最終確認としたことにより、種々のパラメトリックな検討を事前に行い、最適防護柵を考案して、実車衝突実験での失敗を最小限にできるようにして、コストを最小限に抑え設計の自由度を生かすようにした。

3. 環境負荷低減性と経済性の評価

LCAは元々製品開発を対象としており、1969年に米国のコカ・コーラ社がミッドウエスト研究所へ委託したリターナブル瓶が始まりだと言われており、近年では1997年6月にISO（国際標準化機構）によりISO14040「環境マネジメント-ライフサイクルアセ

表-7 対象とする防護柵

種類	材料など	
たわみ性防護柵 (橋梁用防護柵)	鋼製	
	アルミニウム合金製	
剛性防護柵	コンクリート製	スリップフォーム工法
		プレキャスト工法
複合防護柵	鋼-コンクリート	
	アルミニウム合金-コンクリート	

スメントー原則及び枠組み」が発行されている⁹⁾。つまり、防護柵は土木構造物ではあるが製品としての特徴をもってLCAを適用する意義が十分ある。

本研究では、新たに取り入れた防護柵の環境負荷低減性と経済性を、LCA（ライフサイクルアセスメント）とLCC（ライフサイクルコスト）によって明らかにする。また、比較のためにリサイクル材を用いた場合の環境負荷およびコストの考察、交通事故に伴う防護柵補修による影響度の考察を行った。

(1) LCA, LCCの条件設定

土木学会地球環境委員会¹⁵⁾や伊藤ら⁷⁾⁹⁾の研究により、ISOによるLCAの手法を土木分野に適用しており、各フェイズは以下ようになる。

- ① ライフサイクルの分類（建設、供用、廃棄）
- ② 評価のために必要な原単位の収集
- ③ 対象とする構造物の二酸化炭素排出量の算定
- ④ 代替形式、工法の検討

第1段階であるライフサイクルの分類においては、建設段階、供用（維持管理）段階、廃棄・取替え段階それぞれについて、環境負荷の算定を行うこととする。ここで、環境負荷評価指標は様々なものがあるが、二酸化炭素排出量が最も簡便で良い指標となる。本研究においても、二酸化炭素排出量を算出することによって、防護柵の環境負荷低減性を評価する。同様に、コストも販売価格や土木コスト情報¹⁶⁾、ヒアリングなどから算定した。

ここで、ライフサイクル全体における環境負荷 E_T 及びコスト C_T は、次のように表される¹⁷⁾。

$$E_T = E_C + E_M + E_R + \sum P_D E_D$$

$$C_T = C_C + C_M + C_R + \sum P_D C_D$$

ここで、

E_T , C_T = ライフサイクル全体の環境負荷及びコスト
 E_C , C_C = 建設段階での環境負荷及びコスト

E_M , C_M = 維持管理段階（供用）段階での環境負荷及びコスト

E_R, C_R =廃棄・取替え段階の環境負荷及びコスト

P_D =所定の被害が起こる確率

E_D, C_D =所定の被害に伴う環境負荷及びコスト

$\Sigma P_D C_D$ は、リスク費用（損失期待値）と呼ばれ、地震や台風などすべての被害モードの和を意味する。例えば、地震によるリスク費用の算出は、時間経過に伴う構造物の耐久劣化に応じて求められる fragility 曲線と地震ハザード曲線を基に算出できる¹⁸⁾。

本研究において使用するCO₂排出量の原単位は、基本的には、土木学会の地球環境委員会¹⁵⁾とアルミニウム協会¹⁹⁾の積上げ法による値を使用する。しかし、今回の研究で必要な原単位を全て得ることができないので、建設省土木研究所¹⁰⁾の産業関連分析法による値を、比率を掛け合わせて原単位を計算した独自の原単位を用いる。

対象防護柵は、表-7に示す高速道路の橋梁または高架部分に設置される全種類の構造物用路側防護柵¹²⁾とする。たわみ性防護柵に関しては、景観的な配慮から一般道の防護柵とは異なるデザインが施される橋梁用防護柵（橋梁用ビーム型防護柵）を対象とする。剛性防護柵は、スリップフォーム工法またはプレキャスト工法で施工されるコンクリート製防護柵を対象とする。

次に、防護柵の寿命を設定する。防護柵は、約100

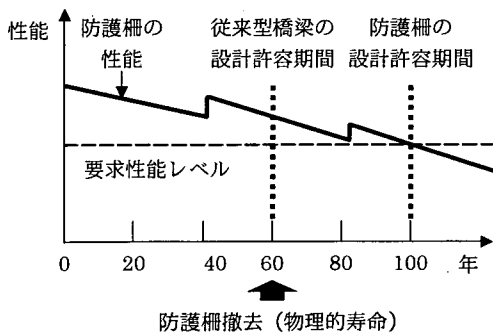
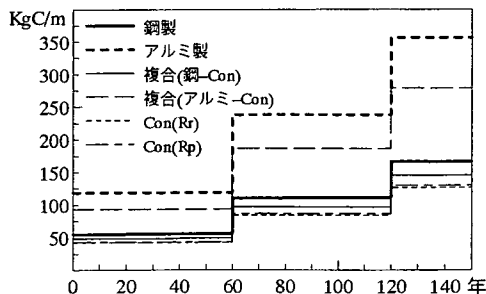


図-9 防護柵の寿命



(a) CO₂排出量の比較

年の寿命（設計供用期間）を期待して設計されているが、従来型橋梁の設計供用期間は60年とされており、図-9に示すように防護柵は設計供用期間に到達する以前に取り替えが行われている。このことから、防護柵の寿命は、橋梁の設計供用期間に依存する物理的寿命の60年とする。

鋼材を使用した防護柵に関しては、塗装寿命を考慮する必要があるが、腐食が進行した状態で放置されている場合が多く、定量的なデータは算出されていない。ただし、日本道路公団では、橋梁の塗装を約20年で行っており、防護柵に関しても同時に再塗装を行う場合がある。以上より、本研究では、鋼製の防護柵の塗装寿命を、20年と仮定して算定を行う。その他の防護柵に関しては、メンテナンスフリーと仮定した。

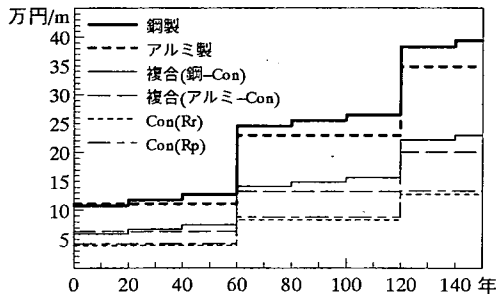
なお、CO₂排出量を表す単位にはkg-C（炭素換算重量）とkg-CO₂があり、kg-Cをkg-CO₂に換算するには44/12を掛ければよい。本研究では、kg-Cを採用したが諸外国及びISO-14040規格では、kg-CO₂が使われている。

(2) 防護柵のLCAとLCCの結果と考察

CO₂排出量とコストを算出した結果を図-10に示す。ここで、図中では、アルミニウム合金製をアルミ製、複合防護柵（鋼-コンクリート）を複合（鋼-Con）、複合防護柵（アルミニウム合金製-コンクリート）を複合（アルミ-Con）、スリップフォーム工法のコンクリート製防護柵をCon（Rr）、プレキャスト工法のコンクリート製防護柵をCon（Rp）とした。

維持管理段階における環境負荷は、鋼製防護柵と複合防護柵（鋼-コンクリート）の塗装によるもののみであり、その他の防護柵はメンテナンスフリーと仮定したのでCO₂は排出しない。塗装1回あたりのCO₂排出量は建設段階の約0.8%程度であり、60年の段階（塗装2回）で1.6%しかなく塗装回数によって環境負荷の順位が入れ替わるほどの影響はない。

また、アルミニウム合金製の防護柵（アルミニウ



(b) コストの比較

図-10 従来型橋梁における各防護柵の比較

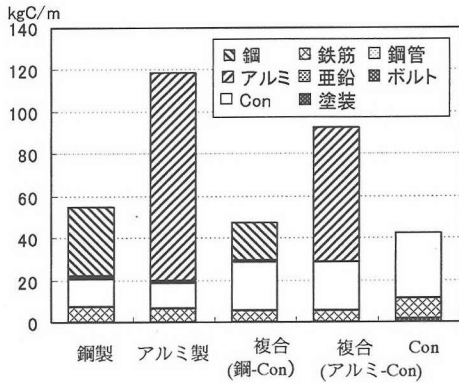


図-11 建設段階における材料別CO₂排出量

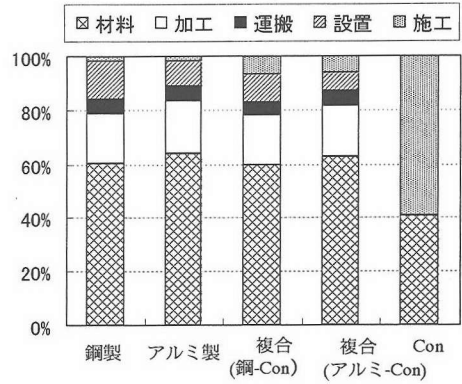
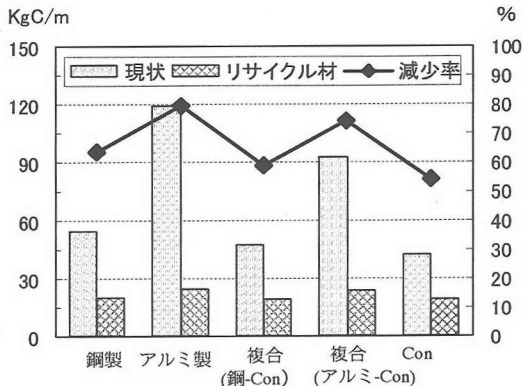
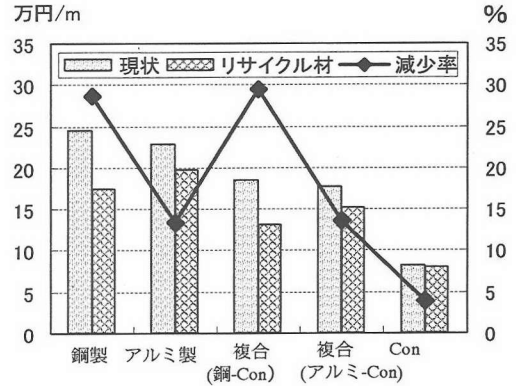


図-12 建設段階におけるコストの内訳



(a) 建設段階のCO₂排出量減少率



(b) 建設段階のコスト減少率

図-13 リサイクル材を用いた場合の比較

ム合金製防護柵、アルミニウム合金-コンクリート複合防護柵)の方が、他の種別と比較して約2.4倍、約1.8倍となり、環境負荷が大きくなった。これは、アルミニウム合金のCO₂原単位が大きく、単位重量が小さく施工性が良い一方、製造する段階で多量のCO₂を排出しているためである。

コストを比較すると、コンクリート製防護柵が、他の形式に比べて有利な結果となった。たわみ性防護柵だけで比較すると、鋼製は、塗装約2回でアルミニウム合金製よりコストが大きくなり、取替えの60年の段階で約7%大きくなる。

CO₂排出量は、建設時が大部分であるので、建設時における材料別CO₂排出量を詳細に検討する。図-11に材料別CO₂排出量を示す。アルミニウム合金製の防護柵は、アルミニウム合金だけで、全体の約83%を占める。一方、どの防護柵においてもコンクリート(図中では、Conと表記)からCO₂が約17kgC/m~32kgC/m発生しており環境負荷が大きい。これは、CO₂原単位(84.9kgC/m³)が他と比べて大きいことと見た目より材料数量が多いからである。

コストについても建設段階の内訳を検討すると図-12に示すように、コンクリート製防護柵以外は、材料コストが60%以上占め、リサイクル材を使用することによって、コストを低減できる可能性があることが分かる。

なお、鋼を使用した防護柵に関しては塗装寿命の仮定はかなり大胆なものもあり、どのように扱うかによって結果が大きく違ってくる。しかし、維持管理を怠ると防護柵の性能劣化をまねき、安全性能が低下する可能性が出てくる。また、景観性能を満たすために塗装も十分考慮しなければならないと考えられる。

(3) リサイクル材使用に関する検討

環境負荷の低減やコスト削減という観点から考えた場合、構造物の寿命を長寿命化させることに加え、リサイクル材を使用する方法も考えられる。橋梁に設置される防護柵は、橋梁寿命に依存するので長寿命化を図るよりも、リサイクル材を使用することが重要であると考えられる。ただし、リサイクル材を

表-8 要求性能の設定

要求性能	ランク	説明
安全性能	逸脱防止性能	最重要 小・中損傷にとどめる
	乗員安全性能	最重要 規定値を十分に満たす
使用性能	展望性	重要 中程度の展望性
	維持管理性能	重要 維持管理が容易である
施工性能	重要	施工が容易である
景観性能	重要	周囲の景観と調和
美観性能	重要	利用者に快い
地域、地球環境 対応性能	一般	環境基準を満たす

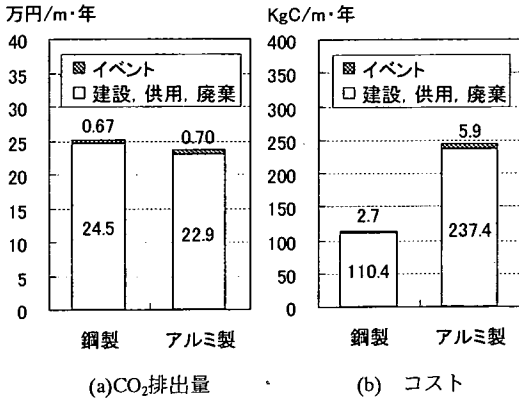


図-14 イベントを考慮した場合の算定結果

使用することによって防護柵の安全性能などが低下することがあってはならないので、性能の低下がほとんど見られない技術が確立されることが必要条件である。現状では、リサイクル材の使用を促進する必要は少ないとも考えられる。

まず、鋼材については電炉材を、コンクリートは高炉スラグ45%混入のものを使用するものとした。また、アルミニウム合金はリサイクルが進んでおり、日本アルミニウム協会のデータ¹⁹⁾などから、新地金と再生地金の投入比1:4までリサイクルが進んだと仮定して、独自にCO₂原単位を算出した。

リサイクル材を用いた場合の建設段階での比較を図-13に示す。CO₂排出量は、アルミニウム合金製の防護柵で約80%、鋼製の防護柵で約60%、コンクリート製の防護柵で約50%低減でき、アルミニウム合金製の防護柵で特に低減率が高いことが分かった。アルミニウムは、再生地金をつくるのに必要なエネルギーは、新地金をつくる場合に比べてわずか3%ですむので、CO₂排出量においても大幅な低減が期待できると考えられる。コストにおいては、鋼製の防護柵は、約30%低減できアルミニウム合金製よりも小さくなり、リサイクル材使用がコスト削減にも有用であると考えられる。

(4) 交通事故による防護柵衝突イベントに関する検討

土木構造物に対するイベントには、例えば地震や台風などがある。しかし、地震や台風などのイベントは、橋梁など構造物全体で考慮するものであり、橋梁の一部である防護柵だけで考慮する必要はないものと考えられる。一方、防護柵特有のイベントとして交通事故による防護柵破壊が考えられる。ただし、コンクリート製防護柵は、車の衝突により突破

された例は少なく、イベントとして考える必要はないと思われる。よって、本研究では、たわみ性防護柵についてのみ交通事故によるイベントを考慮した検討を行う。

高速道路における類型別事故車発生件数²⁰⁾より、防護柵衝突による事故発生率は、19.3%、高速道路の1kmあたり年間事故発生件数は、1.08件/km・年であるので、この値を用いて、イベントを考慮した場合のCO₂排出量とコストを算定した。建設、維持管理、廃棄の1サイクル(60年)を年平均で比較した結果を図-14に示す。ただし、事故の程度による影響は考慮せず、過去の事例を参考に、事故1件につき3スパン長の防護柵を取り替えると仮定した。

取替え期間である60年の段階で、CO₂排出量で約2.5%、コストで約3%増加した。この結果は、事故の程度を考慮しておらず、過大な評価であるにもかかわらず、影響度は小さいことを示している。高速道路においては、事故死亡率は大きい事故発生件数は少ないので、ライフサイクル全体に対して無視できるほどの値であり、防護柵のLCA、LCCには、さほど影響しないものと考えられる。また、コストに関しては、原則として事故当事者が負担することとなっているので、事業主体が考えるライフサイクルコストに、交通事故によるイベントの影響は含めなくてもよいとも考えられる。

本研究では、防護柵取替えのコストだけを対象としたが、社会的なコストを考えると人命という大きな問題がある。しかし、設計速度以下で走行する車両に対しては、乗員が死亡しないように設計されているため人命によるコストは発生しない。また、設計速度以上で走行する車両に対しては、防護柵がどの程度余剰耐力を持っているか明らかにしなければ、考慮することは困難である。今後、余剰耐力を含めた設計が確立されれば考慮することも可能であろう。

4. 性能照査型統合設計システムの検証

(1) 新規防護柵の開発

性能照査型設計システムが現実的に有効に活用できるか検証するために、図-8に示した設計フローに従って要求性能などを決め、実際に新規防護柵を開発し性能照査を行う。防護柵の性能照査は、開発が中心となるので、主に開発フローの検討を行う。

a) 新規防護柵開発の必要性

橋梁または高架に設置される防護柵は、車両の逸脱による2次被害を抑えることが重要である。従来はコンクリート製防護柵が設置されてきたが、路外への展望性があまりなく乗員へ圧迫感を与えることから、コンクリート製の逸脱防止性能の利点と展望性を兼ね備えた複合型防護柵が開発されている。

しかし、コンクリート製防護柵と複合防護柵は剛性が高いため、たわみ性防護柵と比較し衝突時に乗員に発生する加速度が大きくなり、乗員の安全性能は優れているとは言えない。このような背景から、車両の逸脱防止性能、乗員の安全性能、展望性のすべてに優れた防護柵が求められている。

b) 防護柵の機能設定と形式の決定

防護柵を設置する道路の設計速度を高速道路の100km/h、設置場所を高架または橋梁とし、上述した要求を満たす防護柵の要求性能の設定を表-8に示す。車両の逸脱防止性能は2次被害を最小限にとどめるためには、表-1の要求性能マトリックスの最重要構造物とする。乗員の安全性能は、設置基準では車両の重心加速度で評価し、 $200\text{m/s}^2/10\text{ms}$ 未満と規定しているので、この値を十分満足することが制約条件となる。

使用性能は、逸脱防止性能と両立させるために重要構造物とし、中程度の展望性を確保する。

c) 使用材料、寸法の決定と設計図面作成

本研究で開発する防護柵の名称を乗用車対応型複合防護柵（略して乗用車用防護柵）とする。維持管

理、施工性能と景観、美観性能を満足するために、使用材料はアルミニウム合金とする。乗用車用防護柵の使用材料と寸法の概略を表-9に、CADで作成した図面を図-15に示す。

d) 性能照査ための解析モデルの作成

汎用プログラムLS-DYNAを用いて性能照査を行なう。乗用車用防護柵は、CADデータ変換ソフトによって、図-15のCADデータから解析データに変換し図-16に示すようにモデル化した。上部金属部分はシェル要素、コンクリートはソリッド要素を用い、コンクリート下部を固定とした。

動的解析に用いる車両は、図-17と図-18に示す独自に開発した乗用車モデルおよびトラックモデルを使用する。トラックモデルは、伊藤ら^{21), 22)}によって様々な防護柵を有限要素モデル化し数値解析シミュレーションが行なわれてきており、車両誘導性能などは実車衝突実験とよく一致するという結論が得られている。ただし、部材の飛散性能などは現状の解析モデルでは検討できない。文献3)のガイドラインに示されている解析精度の分類から言えばレベルMであろう。

(2) 新規防護柵の性能照査

a) 安全性能の照査

乗用車の衝突条件は、防護柵設置基準の規定である車両重量1t、衝突速度100km/h、衝突角度20度、トラックの衝突条件は、車両重量25t、衝突速度80km/h、

表-9 乗用車用防護柵の材料および寸法

名称	材質・区分	寸法など
支柱	AC4CH-T6	H型
横梁	A6061S-T6	$\phi 200 \times (t7.5)$
乗用車用横梁	A6061S-T6	$80 \times 80 \times (t6)$
スリーブ	SUS	M20×50
六角ボルト	SUS	M16×30
アンカーボルト	強度区分10.9	M20×270
アンカープレート	SS400	$100 \times t16$

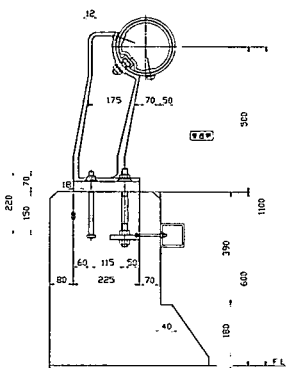
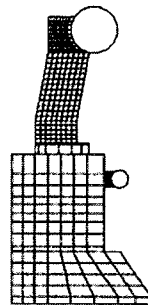
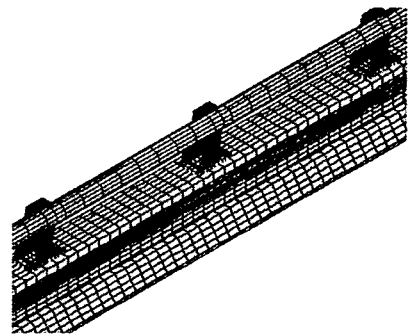


図-15 乗用車用防護柵の形状



(a) 側面図



(b) 立体図

図-16 乗用車用複合防護柵モデル

衝突角度15度とし、安全性能については乗用車の最大重心加速度で評価する。乗用車用防護柵の元となった複合型防護柵に対する解析の最大重心加速度と比較することによって、安全性能が向上したかどうかの照査を行なう。

車両の重心加速度の結果を、10ms移動平均し合成した値を図-19に示す。最大値で比較すると約20%低減されるとの結果を得た。また、防護柵のエネルギー吸収の観点から評価すると、表-10に示すように乗用車用横梁が82kJエネルギーを吸収しており、防護柵のエネルギー吸収の大半を占めていることが分かる。乗用車用横梁は、車両の重心加速度を大幅に低減する効果を持ち、有効に機能したといえる。この性能照査結果から、乗員の安全性能が向上し設定した要求性能を満足するという結論となる。

b) 車両の誘導性能と逸脱防止性能の照査

車両の挙動を図-20、図-21に、車両の離脱速度と

離脱角度を表-11に示す。防護柵設置基準では、離脱速度は衝突角度の60%以上、離脱角度は衝突角度の60%以下と規定しており、この条件が性能照査の制約条件となる。

離脱速度は乗用車が76.2km/h、トラックが71.0km/hとなり衝突角度に対する割合も76.2%、89%とともに十分満足している。離脱角度も乗用車が2.8度、トラックが0.1度と制約条件を満たしている。

また、車両の挙動は、路外へ逸脱することなく防護柵を突破していないことから車両の逸脱防止性能も有していることが分かる。このことから、乗用車用防護柵は車両の誘導性能および逸脱防止性能の要求を満足しているという照査結果が得られたといえる。なお、今回は乗用者の乗員にやさしい防護柵を作るために、複合防護柵に追加の梁を付けたもので表-2

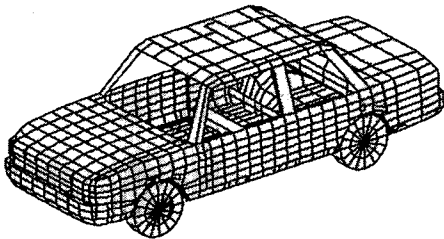


図-17 乗用車モデル

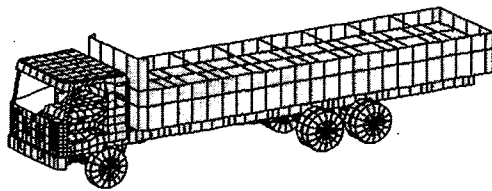


図-18 トラックモデル

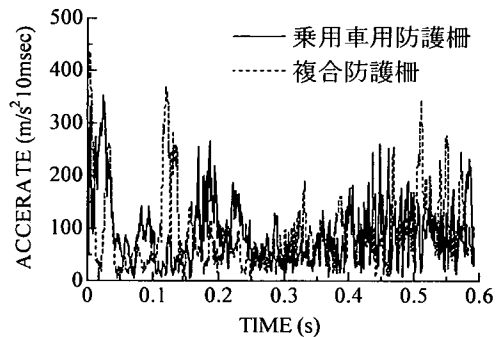


図-19 加速度の比較

表-10 防護柵と車両のエネルギー吸収

エネルギー吸収 (kJ)		車両運動 エネルギー 減少分(kJ)
防護柵		
乗用車用横梁	下部コンクリート	199
82	6	

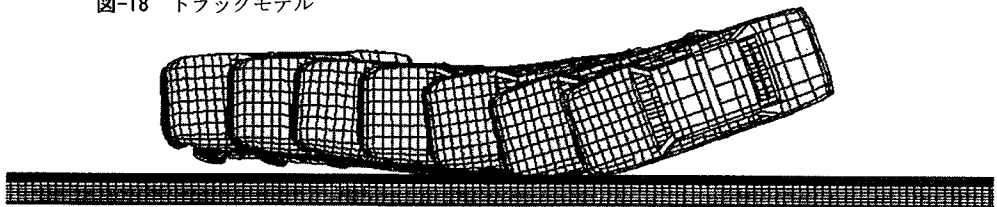


図-20 乗用車の挙動



図-21 トラックの挙動

に示した防護柵の変形などの逸脱防止性能はほとんど元の複合防護柵と同じである。

c) 展望性能の照査

CADデータの有効利用の1例として、簡便で低コストな技術で開発したCADデータ変換ソフトにより作成した走行シミュレーションを図-22に示す。走行時の動画からコンクリート製防護柵と比較して運転者の視点からの展望性を有していることが分かる。アンケートなどで、この感覚を定量化することも将来は可能であろう。ここでは、これを表-4で示した遮蔽率によって定量的に表すと72.0%であり、制約条件の91.7%を満たし約20%低いことから、中程度の展望性を有していると言え設定した要求性能を満足する。

(3) 目的関数の最小化

性能照査を満足した乗用車用防護柵の目的関数を最小化または最適化する。本研究では、4章と同様にLCAとLCCによって環境負荷低減性と経済性について検討する。

建設・維持管理・廃棄の60年で年平均したCO₂排出量とコストを図-23、図-24に示す。乗用車用横梁をつけたことからアルミニウム合金-コンクリート複合防護柵と比べ、CO₂排出量で約13%、コストで約18%増加した。しかし、アルミ製橋梁用防護柵と比べ、CO₂排出量、コストともに低く、優れた逸脱防止性能、乗員の安全性能、展望性能を有しているので優れた環境負荷低減性と経済性を持っていると

表-11 離脱速度と離脱角度

	離脱速度 (km/h)	衝突速度に対する割合 (%)	離脱角度 (度)	衝突速度に対する割合 (%)
乗用車	76.2	76.2	2.8	14
トラック	71.0	89	0.1	1

いえる。アルミニウム合金は、鋼材と比べリサイクル材を用いることにより大幅な環境負荷低減とコスト削減が可能な材料である。このことから、性能を保持したリサイクル材を乗用車対応型複合防護柵に利用できれば、より目的関数を最小化することも可能であると言える。

(4) 最適設計解の決定

車両衝突解析などにより性能照査を行い、車両の逸脱防止性能、乗員の安全性能、展望性に優れた乗用車対応型複合防護柵が開発することができた。ただし、図-7の開発フローで示したように最終確認として実車衝突実験を行う必要があるが、本研究では省略した。

防護柵の設計フローでは、候補防護柵の中から評価項目（要求性能、目的関数）の重み付けを行い、防護柵を決定する。図-23、24からコンクリート防護柵はLCC及びLCCO₂ともに有利であるが、現実に鋼製、アルミ製及び複合型防護柵も用いられている。何を最適として選定していくかは、場所や環境条件により異なるのであろう。これを決定するための重み付けとその評価は、環境負荷低減型土木構造物ガイドライン¹³⁾で非貨幣基準に基づいた意思決定手法が用いられており、防護柵においても何らかの意思

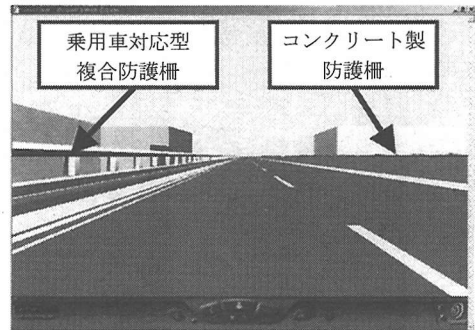


図-22 走行シミュレーション

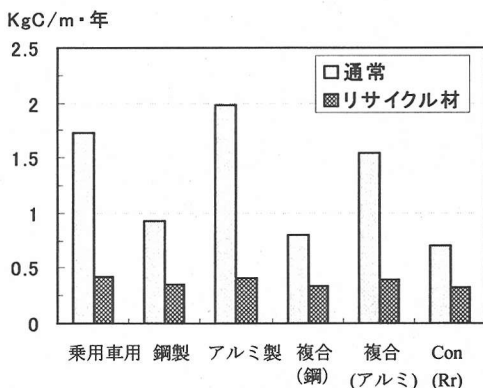


図-23 ライフサイクルCO₂排出量の比較

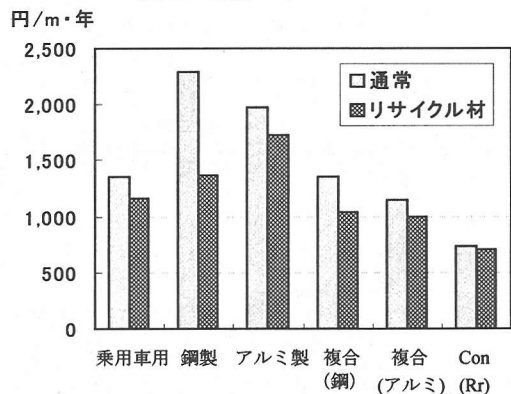


図-24 ライフサイクルコストの比較

決定手法を用い今後評価することが必要であろう。

(5) 他の土木構造物への適用の可能性

本研究では、既に性能照査型設計を採用している防護柵を対象として、防護柵設置基準では考えられていない環境要求性能をも組み入れた性能照査型設計を具体化するための統合システムを考えた。標準要求性能と環境要求性能を組み合わせた考え方と性能照査型設計の枠組は、第一著者も参加した委員会による文献(3), (13)の中で提案された枠組を採用して、防護柵の特徴を考慮して具体的な性能照査の手法を考えシステム化を行っている。今後、このような統合設計手法をさらに複雑な土木構造物についても適用し、ライフサイクルを考えた性能照査型設計をより広い範囲に使えるようにする必要がある。本研究は、個々の既存技術を少しずつ進展させる形で性能照査型統合設計法を組み上げており、他構造物に対してこの種のシステムを行う際の非常に良い例であると考えられる。

5. 結論

本研究において、橋梁用防護柵の性能照査型統合設計システムを提案、開発し、新たに取り入れた環境負荷低減性と経済性の評価を行なった。さらに、例として新規防護柵開発の概要を示し性能照査型設計システムの有効性を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 防護柵の要求性能を標準要求性能と環境要求性能に分類し、安全性能に加え、使用性、環境負荷、景観など取り入れた。その中で、従来の安全性能などと同様に環境負荷などを統合的に扱う手法を示し、性能照査型統合設計システムを開発した。
- 2) 簡便で低コストな技術を用い、CADデータを有効に活用し車両衝突解析や走行シミュレーションなど複数の要求性能を効率的に評価を行なうことができることを示した。
- 3) 性能照査型統合設計システムの有効性を確認するために、新規防護柵を開発し、乗用車に対する加速度は複合防護柵と比べて約20%低減できることを示した。この統合システムは、社会的要求を取り入れ、さまざまな要求性能に優れた防護柵を開発するための道具の1つとして有効であることを明らかにした。
- 4) 建設段階のみならず、維持管理段階、廃棄・取替え段階において環境負荷・コストを縮減できるような防護柵を考慮することは、安全性、施工性等

と同様に重要であることを示した。

- 5) リサイクル材を使用することにより、環境負荷を50%~80%低減することができる可能性を示した。また、交通事故による防護柵衝突のイベントを考慮した場合、CO₂排出量で約5%、コストで約3.5%しか増加せず、全体への影響は非常に小さくなることを示した。

謝辞：最後に、本研究を行なうにあたり、有用な情報の提供にご協力いただいた、土木研究所、住軽日軽、アルミニウム協会、太平洋セメントなどの技術者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 建築研究振興協会：建築構造における性能指向型設計法のコンセプト—仕様から性能へ—、技報堂出版、pp.3-9、2000。
- 2) 市川篤司：鋼橋における性能を基盤にした設計体系への取り組み、鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、第3回、pp.1-11、2000。
- 3) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン、pp.1-14、2001。
- 4) Arpad Horvath, Chris Hendrickson : A Comparison of the Environmental Implication of Asphalt And Steel-Reinforced Concrete Pavements , Transportation Research Board Conference 1998
- 5) SETAC Foundation for Environmental Education : Conceptual Framework for life-cycle Impact Assessment, 1993.
- 6) Thomas E. Graedel : Streamlined Life-Cycle Assessment, 1998.
- 7) 伊藤義人, 平野徹 : 環境負荷を考慮した橋梁形式選定支援システム作成と利用に関する研究, 土木学会論文集, No.533/Vol.-33, pp.187-199, 1996.
- 8) 伊藤義人, 梅田健貴 : 少数支桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1259-1270, 2000.
- 9) 伊藤義人, 永田裕規 : 地球環境負荷削減のための橋梁ライフサイクル評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1295-1306, 1999.
- 10) 建設省土木研究所：土木研究所資料 資源エネルギー消費、環境負荷の算定方法の開発と実態調査報告書（その2）、1994。
- 11) 井村秀文：社会資本整備に係わるLCA手法の体系化と環境評価の総合化、2000。
- 12) 社会法人 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説、丸善、1999。
- 13) 社会法人 土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計

- ガイドライン, 2001.
- 14) Structural Engineering Association of California : VISON 2000 , Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995.
 - 15) 社会法人 土木学会 地球環境委員会:土木建築業における環境負荷評価 (LCA) 検討部会 平成7年度調査研究報告書, 1999.
 - 16) 建設物価調査会:建設物価 臨時増刊 土木コスト情報, 2001.
 - 17) ISO2394 : International Standard "General Principles on Reliability for Structures" , 1998.
 - 18) 赤石沢総光, 吉田郁政:性能設計を活用したRC構造物の保守頻度・時期の最適化に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.227-284, 2001.
 - 19) 社会法人 日本アルミニウム協会:アルミによる省エネ効果情報の整備等に関する調査研究報告書, 2000.
 - 20) 財団法人 交通事故総合分析センター:交通統計 平成12年度版, 2000.
 - 21) 伊藤義人, 森正樹:車両衝突を受ける橋梁用防護柵に関する数値解析的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1635-1644, 1999.
 - 22) 伊藤義人, 宇佐美康一:アルミニウム合金製防護柵の実車衝突に関する数値解析的研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1707-1718, 2001.

(2002. 7. 22受付)

PERFORMANCE-BASED DESIGN SYSTEM OF BRIDGE GUARD FENCES

Yoshito ITOH and Toru SUZUKI

Performance-based design has been prevalent, in which new technology can be easily configured, compared with regulation-based design. In the guard fence design, a new code under the performance-based design concept was implemented and issued in April 1999 in Japan. Also, the environmental problem has become a serious issue in civil engineering field. It is necessary for the researchers and the engineers to pay attention to the environmental impact in addition to the function, safety, cost and aesthetics at all lifecycle stages. In this study, the problems in the guard fence design are first investigated. Taking the results into account, an integrated performance-based design system of bridge guard fences with low environmental impact is developed. It is shown that the system enables us to design the guard fences having high environmental performance and safety performance.